

密度修正对冬小麦/夏玉米轮作田潜热、CO₂ 通量及其能量闭合度的影响*

王娟^{1,2} 曹元元³ 张志广¹ 姜永超¹ 王建林^{3**}

(1. 青岛农业大学理学与信息科学学院 青岛 266109; 2. 西北农林科技大学理学院 杨凌 712100;
3. 青岛农业大学农学与植物保护学院 青岛 266109)

摘要 本文利用涡度相关技术对青岛农业大学现代农业科技示范园试验站 2013—2014 年冬小麦/夏玉米轮作田与大气之间 CO₂、水汽和能量交换进行测量,分别对潜热和 CO₂ 通量进行两种密度修正(WPL 修正和 Liu 修正)并进行对比,计算了两种密度修正前后冬小麦/夏玉米轮作田的能量闭合度。结果表明:WPL 修正与 Liu 修正可以提高潜热通量,WPL 修正后夏玉米田潜热通量约提高 6%,冬小麦田约提高 2%;Liu 修正后夏玉米田提高不足 1%,冬小麦田提高约 2%。因此 WPL 修正对于夏玉米田潜热的修正效果明显优于 Liu 修正,而对冬小麦田潜热修正两种方法效果相同。两种修正方法对于 CO₂ 通量具有降低的修正效果,WPL 修正后夏玉米田和冬小麦田 CO₂ 通量分别降低 3%和 4%;Liu 修正后夏玉米田和冬小麦田 CO₂ 分别降低 2%和 3%。可以看出,WPL 修正和 Liu 修正对 CO₂ 通量修正前后差别非常小(差距均为 1%)。通过对青岛地区冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合度的分析,发现密度修正可以提高能量闭合度,但不同下垫面有不同的修正效果。裸地情况下,WPL 修正可以提高能量闭合度约 2.53%~9.76%,夏玉米田为 4.05%,冬小麦田为 1.35%;而 Liu 修正对裸地能量闭合度的提高小于 2.53%,对夏玉米田和冬小麦田提高约为 1.35%。显然 WPL 修正对于能量闭合度的修正幅度大于 Liu 修正。能量闭合度大小关系为裸地 I (夏玉米出苗前)>裸地 (冬小麦出苗前)>夏玉米田>冬小麦田。

关键词 密度修正 潜热通量 CO₂ 通量 能量闭合度 冬小麦/夏玉米轮作田

中图分类号: P404; S183 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2016)01-0074-07

Influence of density correction on latent heat, CO₂ flux and energy balance closure in winter wheat/summer maize rotation fields*

WANG Juan^{1,2}, CAO Yuanyuan³, ZHANG Zhiguang¹, JIANG Yongchao¹, WANG Jianlin^{3**}

(1. College of Science and Information, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. College of Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract In the past two decades, the eddy covariance technique has been used as a normalized measure method of exchange of CO₂, water vapor and heat between vegetation and the atmosphere. To understand the variation characteristics of CO₂, water vapor and heat fluxes of winter wheat/summer maize rotation system, an experiment was conducted in the period from June 2013 to June 2014 at Qingdao Modern Agricultural Demonstration Farm of Qingdao Agricultural University. The CO₂, water vapor and heat fluxes were measured during both winter wheat and summer maize growing seasons using the eddy covariance method and the values corrected by two density correction methods (WPL correction and Liu correction), and then the

* 国家自然科学基金项目(31171500, 31371574)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050601)资助

** 通讯作者: 王建林, 主要研究方向为作物生理生态学和稳定同位素生态学。E-mail: wangjianlin@qau.edu.cn
王娟, 主要研究方向为环境生物物理学。E-mail: juanwang@qau.edu.cn

收稿日期: 2015-05-18 接受日期: 2015-09-28

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31171500, No. 31371574) and the Special Fund for Strategic Pilot Technology of Chinese Academy of Sciences (No. XDA05050601).

** Corresponding author, E-mail: wangjianlin@qau.edu.cn
Received May 18, 2015; accepted Sep. 28, 2015

difference between the two methods compared. An energy balance closure was also computed during bare and vegetation cover periods of both winter wheat and summer maize based on the two density correction methods. It was found that both of the two methods (WPL correction and Liu correction) increased the amount of latent heat flux. WPL correction method increased latent heat flux by about 6% for summer maize season and 2% for winter wheat season, while Liu correction method increased latent heat flux by less than 1% for summer maize season and about 2% for winter wheat season. WPL correction method reduced the amount of CO₂ flux by less than 3% for summer maize and 4% for winter wheat. Also the Liu correction method reduced the amount of CO₂ by about 2% for summer maize and 3% for winter wheat. There was little difference (about 1%) between the two correction methods for the correction of both latent heat and CO₂ fluxes. The two correction methods had the potential to increase energy balance closure. WPL correction obviously increased energy balance closure by about 2.53%–9.76% for bare soil, by 4.05% for summer maize and by 1.35% for winter wheat. Then Liu correction increased energy balance closure by less than 2.53% for bare soil and 1.35% for both summer maize and winter wheat seasons. This suggested that the degree of correction by WPL method was greater than that by Liu method. Energy balance closure during bare soil period was obviously higher than that during vegetation cover period. The order of the energy balance closure was: bare soil (before maize seed emergency) > bare soil (before winter wheat seed emergency) > summer maize vegetation period > winter wheat vegetation period.

Keywords Density correction; Latent heat flux; CO₂ flux; Energy balance closure; Winter wheat/summer maize rotation field

为了更好地了解地区乃至全球的碳、水循环特点,越来越多的地区建立了碳水通量观测站,并且成为全球碳水通量观测网(FLUXNET)的一员,实时监测地区 CO₂ 的排放与吸收、水的蒸散等动态变化^[1]。涡度相关法虽然还存在一些未能解决的问题,但已经成为国际上公认的测量各种生态系统碳水循环动态变化的标准方法^[2]。密度修正是处理涡度相关系统数据的一个必不可少的过程。最早由 Webb 等^[3]在 1980 年提出对潜热和碳通量进行密度修正,在假定干空气质量守恒基础上,计算出平均垂直速度,从而得出潜热和 CO₂ 通量的计算方法,称为 WPL 修正方法。WPL 修正方法自提出 30 多年以来,一直保持着强有力的生命力,现已经成为对试验观测大气边界层能量和物质通量进行修正的必不可少的部分。截止到 2010 年,对于 WPL 修正的引用已达 130 次·a⁻¹^[4]。可以肯定地说,如果没有 WPL 修正方法,那么 FLUXNET 研究的发展壮大是不可能的。

2005 年, Liu^[5]基于气团的膨胀/压缩的物理理论,在不需要假定干空气质量守恒,无需计算平均垂直速度的情况下,提出了另外一种对潜热和 CO₂ 通量进行密度修正的方法,称为 Liu 修正方法。该修正方法一经发表, Kowalski^[6-7]于 2006 年和 Leuning^[8]于 2007 年对该修正方法提出质疑和批判,认为 Liu 修正是一种错误的理论,而 Liu^[9]也就此发表了自己的观点和看法,双方针对两种密度修正方法进行了激烈地争论。不过,在农田和草地的应用表明,两种修正方法对潜热和 CO₂ 通量的修正并不存在大的差异^[10-11]。两种方法的比较尚需更多的试验结果验证。

本文利用青岛地区 2013 年冬小麦/夏玉米轮作田的涡度相关数据和气象数据,分析了两种密度修正方法对冬小麦/夏玉米轮作田潜热、CO₂ 通量的影响,并且分别计算了冬小麦和夏玉米农田不同生育阶段的能量闭合度,以期对 WPL 修正和 Liu 修正的比较提供更多的试验数据。

1 材料与方法

1.1 观测区状况

本试验在青岛农业大学现代农业科技示范园(东经 120.48°, 北纬 36.26°)内进行,试验所在地属半湿润易旱区,平均气温为 12.4 °C,年平均日照时数为 2 229 h;近 10 年的年平均降雨量为 662 mm,降雨主要集中在 7 月下旬和 8 月上旬。观测面积为 150 m×200 m,除观测区域西面为果树外,其他方向与观测区内种植种类相同,均为冬小麦/夏玉米一年两熟轮作制度。2013 年 6 月 26 日种植夏玉米,品种为‘郑单 958’,采取免耕带肥种植方式,行距为 0.65 m,株距为 0.22 m,肥料为 N-P₂O₅-K₂O(22-10-10)施肥量每公顷 525 kg,在小喇叭口期追施尿素 225 kg·hm⁻²,10 月 10 日收获。2013 年 10 月 14 日种植冬小麦,品种为‘济麦 22’,采取翻耕 1 遍,旋耕 2 遍,带肥种植方式,施 N-P₂O₅-K₂O 肥,每公顷 525 kg;播种量 185 kg·hm⁻²,行距为 0.20 m,2014 年 6 月 16 日收获。试验地的土壤为砂浆黑土, pH 6.7,有机质含量为 12.65 g·kg⁻¹,有效氮、速效磷和速效钾分别为 100.41 mg·kg⁻¹、39.80 mg·kg⁻¹和 135.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验仪器

该站的涡度相关系统位于示范园的东南部,面

积为 30 000 m² 的冬小麦/夏玉米轮作田的中心位置。三维风速用超声风速仪(CAST3, Campbell, USA)测量, 潜热、CO₂ 和 H₂O 的垂直通量由开路式红外气体分析仪(LI-7500, Li-cor, Inc. USA)测量。超声风速仪和红外气体分析仪安装在通量塔的同一高度(玉米生长前期及中期, 高度为 2.5 m, 玉米季后期高度调整至 3.5 m; 整个冬小麦生长季高度固定在 2.5 m), 与数据采集器(CR3000, Campbell, USA)相连, 原始数据采集频率 10 Hz, 每 30 min 输出一个平均值。辐射分量由净辐射仪测量(CNR1, Kipp and Zonen, Netherlands); 地下 5 mm 处安装有 3 个土壤热通量板(HFP01SC, Hukseflux, Netherlands), 测量土壤热通量; 风速风向由安装在 5 m 高度的开关风速计(A100R, Rhyl, Vector, UK)和风向仪(W200P, Vector, UK)测量; 空气温度、湿度由温湿度传感器(HMP45C, Campbell, USA)测量; 降雨量利用雨量筒(52202, Young, USA)测量。这些仪器与数据采集器相连, 每 30 min 输出一个平均值。

1.3 研究方法

涡度相关技术的理论基础(雷诺分解)最早在 1895 年由 Reynolds^[12] 建立, 但由于当时缺乏相应的观测仪器, 该技术并未得到发展和应用。随着快速响应仪器和计算机的发展, 涡度相关技术才得以发展^[13]。当下垫面均匀一致时, 潜热和 CO₂ 通量密度(简称通量)可由下述公式表示^[14]:

$$\text{潜热通量(LE): } LE = \overline{Lw'\rho_v'} \quad (1)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 通量}(F_c): F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (2)$$

式中: w 为垂直方向风速; L 为水的蒸发潜热; ρ_v 为水蒸气密度; ρ_c 为 CO₂ 密度。‘ $'$ ’表示脉动值, ‘ $\overline{}$ ’表示平均值。

1.3.1 密度修正

利用式(1)、(2)进行潜热和二氧化碳通量的计算时, 通常假设垂直风速的时间平均值为零($\bar{w}=0$), 但 Webb 等^[3]指出, 如果空气密度有脉动, 情况则不同, 由于 \bar{w} 值很小, 难以测量, 因此 Webb 等利用干空气质量守恒方程计算出 \bar{w} , 从而得以潜热和 CO₂ 能量的修正结果——WPL 修正。

$$LE = \overline{Lw'\rho_v'}(1+\mu\sigma) + \overline{L\rho_v'}(1+\mu\sigma)\frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}} \quad (3)$$

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}}\mu\overline{w'\rho_v'} + \overline{\rho_c}(1+\mu\sigma)\frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}} \quad (4)$$

式中: T 为空气温度, ρ_a 为干空气密度, μ 为干空气与水汽分子量之比(1.608), σ 为干空气与水汽密度之比。

2005 年, Liu^[5]在不需要假设干空气质量守恒,

不需要计算 \bar{w} 的情况下, 基于气团膨胀/压缩的物理理论, 得出潜热和 CO₂ 通量的修正结果——Liu 修正。

$$LE = \overline{Lw'\rho_v'}\left[\frac{\overline{\rho_v'}}{\overline{\rho}}(\mu-1)+1\right] + L\frac{\overline{\rho_a}}{\overline{\rho}}\overline{\rho_v'}(1+\mu\sigma)\frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}} \quad (5)$$

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho}}(\mu-1)\overline{w'\rho_v'} + \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho}}\overline{\rho_c'}(1+\mu\sigma)\frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}} \quad (6)$$

式中: ρ 为湿空气密度。

1.3.2 能量闭合度分析

能量闭合度分析是对任何生态系统进行水、碳和热量循环研究的一个重要方面, 它可以作为判断数据质量的一个重要指标^[15-16]。国际上常用的能量闭合评价方法有最小二乘法、压轴回归法、能量平衡比率和能量平衡残差 δ 频率分布图法^[17]。本文使用的是最小二乘法进行分析。定义一段时间内有效能量($-(H+LE)$)占可利用能量(R_n-G)的百分比称为能量闭合度(能量平衡比率), 其中 R_n 为净辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), G 为地表土壤热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), H 为显热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), LE 为潜热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)。在理想情况下, 能量闭合度为 100%, 但实际情况中能量闭合度都小于 100%。很多研究表明能量存在不闭合的情况^[18-20], 不闭合度约为 10%~30%^[2,21-22]。计算能量闭合度时, 以 30 min 平均数据为基础, 计算有效能量与可利用能量的比值, 然后再进行统计平均得出能量闭合度。处理数据所使用的软件为 Originpro 8.5 和 Excel 2007。

2 结果与讨论

2.1 密度修正对潜热通量和 CO₂ 通量的影响

对青岛地区 2013—2014 年冬小麦/夏玉米轮作田的潜热通量和 CO₂ 通量进行了 WPL 修正和 Liu 修正, 分别与修正前的潜热通量和 CO₂ 通量进行线性拟合, 结果见图 1 和图 2。

通过对潜热通量进行密度修正分析(图 1), 发现经过 WPL 修正的潜热通量比修正前有所提高, 在夏玉米田 WPL 修正提高幅度约为 6%, 冬小麦田提高约为 2%; 而 Liu 修正对潜热通量同样有提高效果, 但是提高幅度小于 WPL 修正, 夏玉米田不足 1%, 冬小麦田不足 2%。线性拟合的相关系数均在 99%以上。因此可以看出, WPL 修正对潜热通量的修正幅度略大于 Liu 修正。通过对 CO₂ 通量的对比分析(图 2)可以看出, 经过 WPL 修正和 Liu 修正后 CO₂ 通量较修正前有所降低, 夏玉米田 WPL 修正降低幅度约为 3%, 冬小麦田约降低 4%; Liu 修正后夏玉米田 CO₂ 通量降低约 2%, 冬小麦田约降低 3%。线性拟合相关系数均大于 98%。对于夏玉米和冬小麦两种

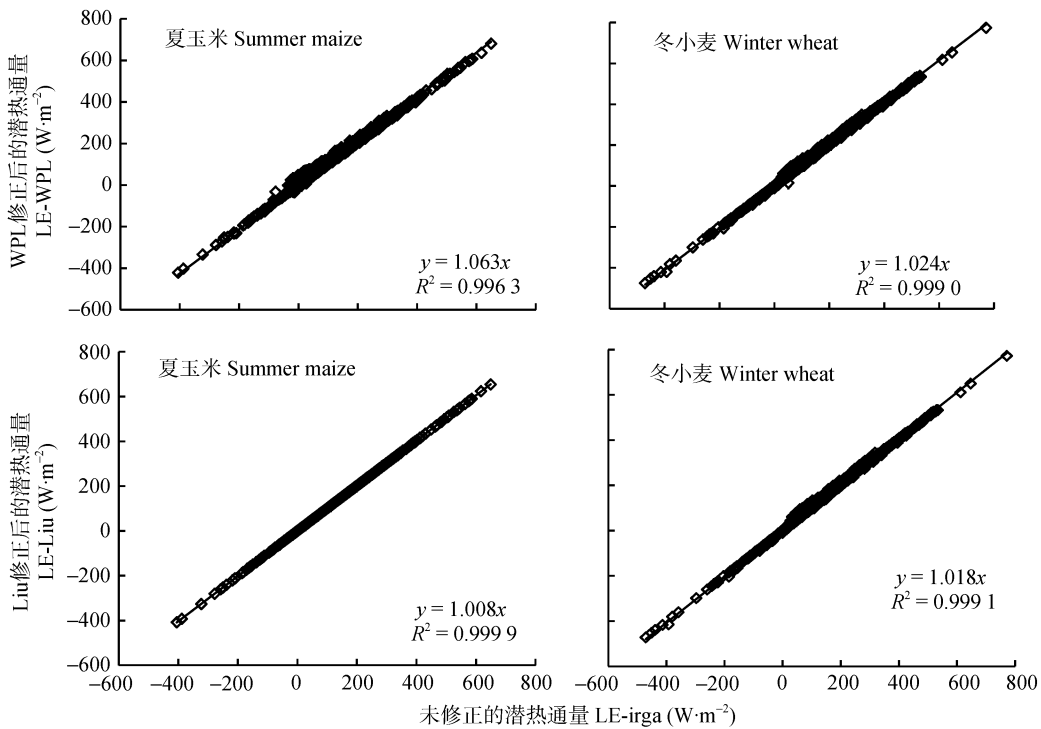


图 1 冬小麦/夏玉米轮作田潜热通量密度修正前后对比(2013—2014)

Fig. 1 Comparison of latent heat flux in winter wheat/summer maize rotation field using WPL correction and Liu correction (2013—2014)

LE-irga: 未修正的潜热通量; LE-WPL: WPL 修正后的潜热通量; LE-liu: Liu 修正后的潜热通量。LE-irga: uncorrected latent heat flux; LE-WPL: latent heat flux of WPL correction; LE-liu: latent heat flux of Liu correction.

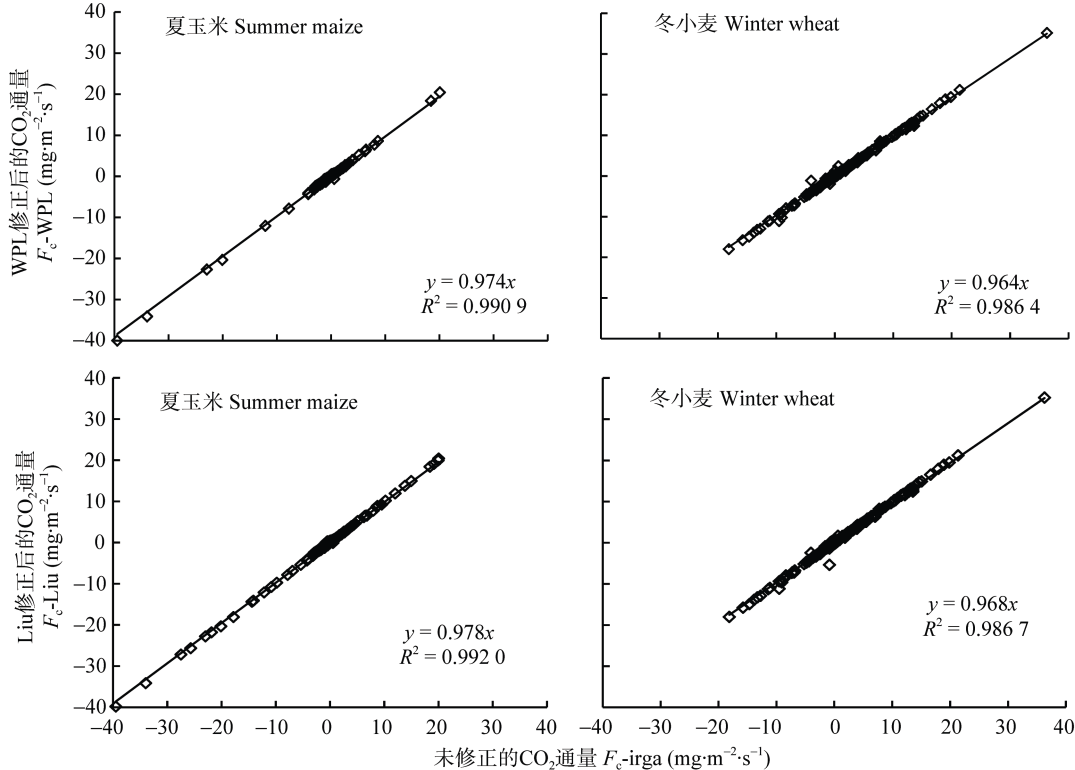


图 2 冬小麦/夏玉米轮作田 CO₂ 通量密度修正前后对比(2013—2014)

Fig. 2 Comparison of CO₂ flux in winter wheat/summer maize rotation field using WPL correction and Liu correction (2013—2014)
F_c-irga: 未修正的 CO₂ 通量; F_c-WPL: WPL 修正后的 CO₂ 通量; F_c-Liu: Liu 修正后的 CO₂ 通量。F_c-irga: uncorrected CO₂ flux; F_c-WPL: CO₂ flux of WPL correction; F_c-Liu: CO₂ flux of Liu correction.

不同的作物, WPL 修正和 Liu 修正对 CO_2 通量的修正差别小于 1%, 这与王有恒等^[10]、柳媛普等^[11]的研究结果一致。

虽然 WPL 修正和 Liu 修正是从不同的角度出发, 但是对潜热和 CO_2 通量的修正效果几乎相同。因此在对湍度数据进行分析时, 两种密度修正方法都可使用。

2.2 不同密度修正方法下能量闭合度的分析

为了解青岛冬小麦/夏玉米轮作田的能量闭合情况, 本文分析了不同情况下农田的能量闭合情况。按照下垫面情况进行能量闭合度分析, 根据轮作田的作物生长情况分为: 1) 小麦收割后至玉米出苗前, 下垫面为裸地(裸地); 2) 玉米出苗后至收获, 下垫面为玉米; 3) 玉米收割后至小麦出苗前, 下垫面为裸地(裸地); 4) 小麦出苗后至收获, 下垫面为小麦。对于每一种情况, 只针对白天($R_n > 0$)^[23]的情况进行闭合度分析, 结果见表 1。

表 1 冬小麦/夏玉米轮作田不同下垫面的能量闭合情况 (2013—2014)

Table 1 Energy balance closure of different underlying surfaces in winter wheat/summer maize rotation field (2013—2014)

	裸地 Bare soil	夏玉米 Summer maize	裸地 Bare soil	冬小麦 Winter wheat
修正前 Raw	0.82	0.74	0.79	0.74
WPL 修正 WPL correction	0.90	0.77	0.81	0.75
Liu 修正 Liu correction	0.82	0.75	0.81	0.75

“Bare soil” is underlying surface after winter wheat harvest and before summer maize emerging. “Summer maize” is underlying surface from summer maize emerging to harvest. “Bare soil” is underlying surface after summer maize harvest and before winter wheat emerging. “Winter wheat” is underlying surface from winter wheat emerging to harvest.

从表 1 可以看出: 1) 对青岛冬小麦/夏玉米轮作田的能量闭合度 WPL 修正前后进行对比, 发现经过 WPL 修正后的能量闭合度较修正前都有所提高, 裸地时期分别提高 2.53% 和 9.76%, 玉米生长季提高 4.05%, 小麦生长季提高幅度较小(1.35%)。而 Liu 修正对能量闭合度的影响较 WPL 修正小, 裸地 没有变化, 裸地 提高了 2.53%, 玉米生长季和小麦生长季均约提高 1.35%。整个玉米季全天的能量闭合度(WPL 修正后)为 0.80, 小麦季为 0.77, 中国通量网站的平均能量闭合度为 0.73^[24], 虽然冬小麦和夏玉米田的能量闭合度均稍高于平均水平, 前者却小于刘渡等^[25](1.15)及沈彦俊等^[26](0.90~0.95)的研究结果, 后者介于刘渡等^[25](0.78)和李祎君等^[27](0.85)的

研究结果之间。2) 对于不同下垫面进行分析, 发现能量闭合度为裸地 > 裸地 > 夏玉米 > 冬小麦。虽然都为裸地, 能量闭合情况裸地 优于裸地 原因可能在于夏玉米收获后至小麦出苗前(裸地), 地面存留的秸秆比小麦收获后要多, 因此对能量闭合度的影响大些。裸地能量闭合度高于植物生长季, 其原因在于植被覆盖期忽略了很多能量项(如冠层热储存), 导致能量闭合度降低。此外, 不同植被覆盖的地表反射率不同, 从而影响能量闭合程度。能量闭合度为夏玉米 > 冬小麦, 该结果与刘渡等^[28]的研究结果不同, 可能是气候条件及仪器原因造成的; 但是与李正泉等^[24]的研究结果一致, 冬天的能量闭合情况低于夏季的能量闭合情况, 相关确切的结论, 还需要进一步验证。

3 结论

通过对青岛农业大学现代农业科技示范园试验站冬小麦/夏玉米轮作田潜热和 CO_2 通量进行 WPL 修正和 Liu 修正对比分析, 得出 WPL 修正与 Liu 修正这两种密度可以提高潜热通量, WPL 修正对夏玉米农田提高 6%, 对冬小麦提高 2%, Liu 修正对夏玉米农田提高仅不足 1%, 冬小麦为 2%, 因此 WPL 修正对夏玉米农田潜热的修正幅度略大于 Liu 修正。WPL 修正和 Liu 修正对于 CO_2 通量有降低的效果, WPL 修正对夏玉米田和冬小麦田降低幅度分别为 3% 和 4%; Liu 修正对夏玉米田和冬小麦田的降低幅度分别为 2% 和 3%, 不论对于夏玉米还是冬小麦, 两种密度修正前后差距仅约 1%。所以 WPL 修正和 Liu 修正对于潜热通量和 CO_2 通量的修正效果差异不显著。

通过对青岛冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合度进行分析, 发现 WPL 修正和 Liu 修正可以提高能量闭合度, 且对于不同的下垫面有不同的修正效果。WPL 修正在裸地时期可以提高能量闭合度 2.53%~9.76%, 玉米和小麦生长季分别提高约 4.05% 和 1.35%, 而 Liu 修正对能量闭合度的提高裸地时期小于 3%, 玉米和小麦生长季均提高约 1.35%。通过对比发现 WPL 修正对能量闭合度的影响高于 Liu 修正, 且下垫面不同时提高幅度不尽相同, 提高最大的为裸地 时期, 小麦生长季提高最少, 仅为 1%。不同下垫面能量闭合度关系为裸地 > 裸地 > 夏玉米 > 冬小麦。

参考文献 References

- [1] Kowalski A S, Serrano-Ortiz P. On the relationship between

- the eddy covariance, the turbulent flux, and surface exchange for a trace gas such as CO₂[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124(2): 129–141
- [2] Kidston J, Brümmer C, Black T A, et al. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications for CO₂ flux measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(2): 193–218
- [3] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85–100
- [4] Lee X H, Massman W J. A perspective on thirty years of the Webb, Pearman and Leuning density corrections[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 139(1): 37–59
- [5] Liu H P. An alternative approach for CO₂ flux correction caused by heat and water vapour transfer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 115(1): 151–168
- [6] Kowalski A S. Comment on “An alternative approach for CO₂ flux correction caused by heat and water vapour transfer” by Liu[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(2): 353–355
- [7] Kowalski A S. Further comment on “Reply to the comment by Kowalski on ‘An alternative approach for CO₂ flux correction caused by heat and water vapour transfer’ by Liu”[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(2): 365–366
- [8] Leuning R. The correct form of the Webb, Pearman and Leuning equation for eddy fluxes of trace gases in steady and non-steady state, horizontally homogeneous flows[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(2): 263–267
- [9] Liu H P. Reply to the comment by Kowalski on “An alternative approach for CO₂ flux correction caused by heat and water vapour transfer”[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(2): 357–363
- [10] 王有恒, 景元书, 郭建侠, 等. 涡度相关通量修正方法比较[J]. *气象科技*, 2011, 39(3): 363–368
Wang Y H, Jing Y S, Guo J X, et al. Contrast research on flux correction methods for eddy-covariance measurement[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2011, 39(3): 363–368
- [11] 柳媛普, 李锁锁, 吕世华, 等. 几种通量资料修正方法的比较[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1704–1711
Liu Y P, Li S S, Lü S H, et al. Comparison of flux correction methods for eddy-covariance measurement[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(6): 1704–1711
- [12] Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion[J]. *Philosophical Transactions of Royal Society of London A*, 1895, 186: 123–164
- [13] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere[J]. *Journal of Meteorology*, 1951, 8(3): 135–145
- [14] Hsieh C I, Lai M C, Hsia Y J, et al. Estimation of sensible heat, water vapor, and CO₂ fluxes using the flux-variance method[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2008, 52(6): 521–533
- [15] 张强, 李宏宇. 黄土高原地表能量不闭合度与垂直感热平流的关系[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5888–5895
Zhang Q, Li H Y. The relationship between surface energy balance unclosure and vertical sensible heat advection over the loess plateau[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5888–5895
- [16] Leuning R, Denmead O T, Lang A R G, et al. Effects of heat and water vapor transport on eddy covariance measurement of CO₂ fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, 23(2): 209–222
- [17] 张新建, 袁凤辉, 陈妮娜, 等. 长白山阔叶红松林能量平衡和蒸散[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 607–613
Zhang X J, Yuan F H, Chen N N, et al. Energy balance and evapotranspiration in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 607–613
- [18] Hammerle A, Haslwanter A, Schmitt M, et al. Eddy covariance measurements of carbon dioxide, latent and sensible energy fluxes above a meadow on a mountain slope[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122(2): 397–416
- [19] Ferreira M I, Silvestre J, Conceição N, et al. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques[J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(5): 433–447
- [20] Liu H P, Randerson J T, Lindfors J, et al. Consequences of incomplete surface energy balance closure for CO₂ fluxes from open-path CO₂/H₂O infrared gas analysers[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(1): 65–85
- [21] 贾志军, 张稳, 黄耀. 三江平原稻田能量通量研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 820–826
Jia Z J, Zhang W, Huang Y. Analysis of energy flux in rice paddy in the Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 820–826
- [22] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223–243
- [23] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 1–22
- [24] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价[J]. *中国科学 D辑*:

地球科学, 2004, 34(Sup. 2): 46–56

Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites[J]. Science China: Earth Sciences, 2004, 34(Sup. 2): 46–56

- [25] 刘渡, 李俊, 于强, 等. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5309–5317

Liu D, Li J, Yu Q, et al. Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5309–5317

- [26] 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1004–1010

Shen Y J, Liu C M. Agro-ecosystems water cycles of the

typical irrigated farmland in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1004–1010

- [27] 李祎君, 许振柱, 王玉龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1132–1144

Li Y J, Xu Z Z, Wang Y L, et al. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(6): 1132–1144

- [28] 刘渡, 李俊, 同小娟, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 493–499

Liu D, Li J, Tong X J, et al. Analysis of the energy balance closure in a winter wheat/summer maize double cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 493–499